

6. Brockmeyer J. W., Aubrey L. S. Application of ceramic foam filter in molten metal filtration // Ceramic Eng. Sci. Proc. - 1987. - V. 8, № 1-2. - P. 63-67.
7. Ренях С. И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям. – Днепропетровск: Лира ЛТД, 2006. - 1056 с.

Поступила 03.03.09

удк 621.74.047

В. А. Середенко, Е. В. Середенко

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ВНЕДРЕНИЕ СТРУЙ МЕТАЛЛОВ В ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СРЕДЫ С МЕНЬШЕЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ

Рассмотрены некоторые физические особенности технологических процессов, базирующихся на взаимодействии неизотермических расплавов при получении сплавов и литых изделий. Исследован ряд характерных вариантов внедрения металлических струй в расплавленные металлы с различными температурами, плотностью и теплопроводностью. В критериальной форме определены основные рациональные физические параметры проведения процессов приготовления сплавов методом смешения, суспензионного литья с использованием охлаждающих жидкостей, получения шарообразных и непрерывнолитых тел в жидкометаллической среде.

Розглянуто деякі фізичні особливості технологічних процесів, які базуються на взаємодії неизотермічних расплавів при отриманні сплавів і литих виробів. Досліджено ряд характерних варіантів впровадження металевих струменів у розплавлені метали з різними температурами, густиною і теплопровідністю. В критеріальній формі визначено основні раціональні фізичні параметри проведення процесів приготування сплавів методом змішення, суспензійного лиття з використанням охолоджуючих рідин, отримання кулястих та безперервнолитих тіл у рідкометалевому середовищі.

Some physical peculiarities of the technological processes based on interaction between non-isothermal melts in alloys and cast wares production were concerned. The number of characteristic variants introducing of the metallic jets into the melted metals with different temperatures, density and heat conductivity was investigated. Major rational physical parameters of process conducting for alloys production by mixing, suspension casting in make use of cooling liquids and production of spheroidal from bodies and continual casted ones in the liquid metallic medium were defined in criterion from.

Ключевые слова: внедрение, струи, металлы, охлаждающие расплавы

Взаимодействие струй металлов с другими расплавами, отличающихся, как правило, температурами нагрева, характерно для технологий получения сплавов методом смешения [1], легирования и раскисления стали жидкими металлами и сплавами [2, 3], процесса суспензионного способа литья слитков с применением жидких охлаждающих сред [4, 5], изготовления металлических шаров в охлаждающих расплавах [6], диспергирования струй металлов в менее нагретых расплавах при модифицировании сплавов [7] и получении гранул [8], непрерывной разливки стали в “мягкие кристаллизаторы” [9] и ванны с жидкометаллическим охладителем [10, 11].

Указанные процессы получения сплавов и литых изделий требуют учета ряда физических особенностей взаимодействия жидких металлов. Так, технологии на основе метода смешения требуют обеспечения активного гидродинамического взаимодействия жидких металлических компонентов во всем объеме расплава. Для реализации этого необходимы

развитая межфазная поверхность и вовлечение в перемешивание всего расплава. При этом нужно глубинное проникновение струй и развитие коротковолновых возмущений на межфазной поверхности. В суспензионном литье требуется диспергирование струй в охлаждающей среде сразу после их контакта, особых требований к форме диспергированной фазы не предъявляется. При получении гранул и шаров необходимо обеспечить сферичность их поверхности и подавить ее колебания коротковолнового диапазона. В процессе изготовления непрерывнолитых заготовок для формирования их стабильной формы требуется предотвращение как длинно-, так и коротковолновых колебаний на поверхности образующегося твердого тела.

Недостаточная изученность процессов межфазного взаимодействия расплавленного металла с жидкой средой при неизотермическом состоянии фаз, ограниченное применение адекватных внешних воздействий в указанных технологических процессах являются главными препятствиями, которые сдерживают развитие подобных методов литья.

В настоящем исследовании изучалось влияние соотношения температур, плотностей и теплопроводностей струй и охлаждающих жидких сред на формирование межфазной поверхности, характер поведения в зависимости от способа ввода в контакт расплавленных объемов, внедряющихся в жидкость, с которой они не смешиваются либо имеют ограниченную растворимость в определенной температурно-концентрационной области.

Взаимодействие жидкостей, нагретых перед контактом до различных температур, изучали по методике, структура которой приведена на рис. 1.

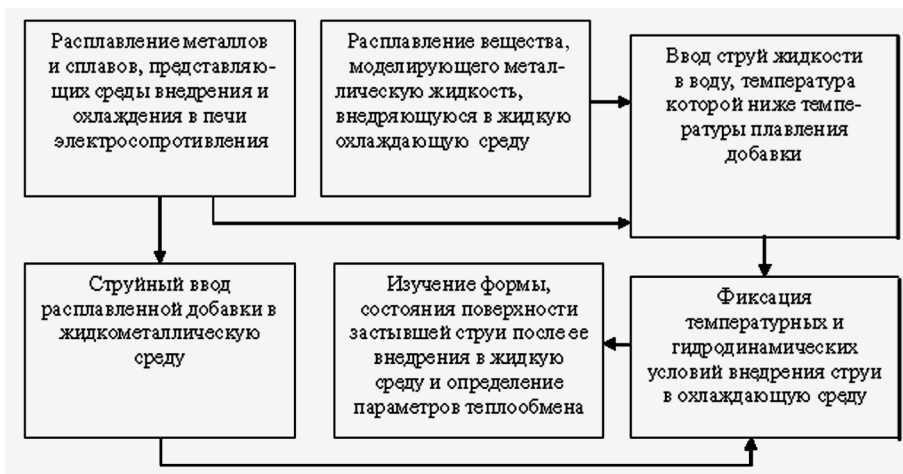


Рис. 1. Порядок проведения экспериментов при изучении взаимодействия струй расплавленных металлов с жидкой охлаждающей средой

Эксперименты проводились на прозрачных неметаллических жидкостях, моделирующих металлы, расплавленных металлах и сплавах. Физические характеристики использованных веществ взяты из работ [12-17] и рассчитаны по правилу аддитивности, а некоторые определены экспериментально. Расчет коэффициента теплоотдачи α при использовании неметаллических жидкостей (число Прандтля (Pr) в условиях опыта для парафина 8,3, для воды - 7,6) производился с помощью числа Нуссельта (Nu) для варианта течения цилиндрической струи с охлаждением по внешней границе [18] и движения шара в жидкости [19]. В случае металлических жидкостей коэффициент α определяется по числу Nu , установленному при течении металлов ($Pr \ll 1$) в трубах при значениях числа Пекле (Pe) $20 < Pe < 1 \cdot 10^4$ [20]. Скорости струй рассчитывались по формуле Торичелли или определялись по времени прохождения поршня в канале определенной длины, из которого вытеснялась жидкость.

При вводе струи жидкости с температурой плавления $t_{пл}^c$ в другую охлаждающую жидкость с температурой $< t_{пл}^c$ обеспечивались соотношения их плотностей $K_p < 1$ и соотношение теплопроводностей $K_\lambda < 1$ в первом варианте, а во втором - $K_p > 1$, $K_\lambda > 1$.

Новые методы и прогрессивные технологии литья

Исследовались схемы подачи расплавленного металла как свободной струей через газовую среду, так и напорным вводом жидкости под уровень другой по трубопроводу.

Подача вертикальной струей диаметром (d_c) 5 мм расплавленного ($54\text{ }^\circ\text{C} - 1,04\text{ }t_{пл}$) парафина производилась в воду ($15\text{ }^\circ\text{C} - 0,29\text{ }t_{пл}$) через воздух ($K_p = 0,78$; $K_\lambda = 0,82$). При скорости внедрения (v) до $0,5\text{ м/с}$ парафин проникал под уровень воды на глубину до 17 мм , где лобовая часть струи застывала. Последующие порции проникали на меньшую глубину, застывая на предыдущих объемах с образованием наплывов. В результате на оси падения струи формировалась коническая отливка, переходящая в диск, растекавшийся на поверхности воды во все стороны. В газовой среде в момент касания лобовой части струи поверхности воды число Вебера (We) достигало значения $0,065$, число Фруда (Fr) - $5,1$, число Рейнольдса (Re) - 485 . При движении струи в охлаждающей жидкости и торможении парафина число We резко снижалось до $0,005$ (межфазное натяжение $\sim 0,077\text{ Н/м}$), число Fr - до $1 \cdot 10^{-3}$, а число Re - до 8 . Значение числа Nu при этом было равно $6,5$, коэффициента теплообмена (α) - $780\text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$, плотности теплового потока на межфазной поверхности (q) - 35098 Вт/м^2 .

Ввод струи легкоплавкого сплава (сплав Вуда), нагретого до $95\text{ }^\circ\text{C}$ ($1,19\text{ }t_{пл}$), вертикально вниз в воду с температурой $15\text{ }^\circ\text{C}$ ($0,19\text{ }t_{пл}$) через воздух ($K_p = 10$; $K_\lambda = 21,7$) со скоростями $0,1-0,3\text{ м/с}$ характеризовался следующими параметрами струи перед внедрением в охладитель: $Re = 176-529$; $Fr = 0,2-1,8$; $We = 1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3}$. В охлаждающей жидкости сохранялся сплошной участок струи сплава длиной $3-4\text{ см}$, после чего она распалась на капли и цилиндры. Скорость струи в зоне распада возрастала до $0,8\text{ м/с}$ ($Re = 1400$; $Fr = 21$; $We = 6,4$). Дискретные области сплава затвердевали в разнообразных формах ($Nu = 10$; $\alpha = 2014\text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$; $q = 161105\text{ Вт/м}^2$). Их можно разделить на компактные (шарики, шарики с хвостами и впадинами с характерными размерами, близкими к d_c) и протяженные, длиной до $10\text{ }d_c$ и диаметром менее $d_c/2$ (цилиндры с острыми концами).

При напорной подаче расплавленного ($65\text{ }^\circ\text{C} - 1,25\text{ }t_{пл}$) парафина под уровень воды ($0,29\text{ }t_{пл}$) через сопло диаметром (d_c) 13 мм вертикально вниз со скоростью до $0,005\text{ м/с}$ образовывались компактные сгустки неправильной формы с намывами и прорывами жидкого парафина через затвердевшие участки поверхности (таблица, опыт № 1; рис. 2, а).

Скорость затвердевания лобовой части струи при такой скорости подачи парафина и противодействия более плотной среды соизмерима со скоростью выхода из сопла горячих жидких объемов. Равномерный отвод жидкого парафина в этих условиях блокируется, что приводит к образованию сгустков с характерными размерами, значительно превосходящими d_c . В интервале изменения скорости подачи парафина из сопла $0,006-0,010\text{ м/с}$ струи имели форму, близкую к цилиндрической (таблица, опыт № 2; рис. 2, б), но при незначительном изменении скорости в процессе подачи парафина форма струи нарушалась и возникали утолщения и искривления (таблица, опыт № 3; рис. 2, в). Повышение скорости в интервале от $0,01$ до $0,07\text{ м/с}$ приводило к появлению неровностей и каверн на поверхности струи, которая в общем сохраняла форму цилиндра (таблица, опыт № 4; рис. 2, г). Подача струи парафина в воду снизу вверх со скоростью до $0,07\text{ м/с}$ приводила

Параметры процесса ввода струи жидкого парафина через трубопровод под уровень охлаждающей водяной среды

Номер опыта	Re	Nu	α , Вт/(м ² · К)	q, Вт/м ²	Формы струй (рис. 2)
1	15	9,8	451	20292	а
2	17-19	9,8-10,6	454-490	20437-22156	б
3	30	11,0	508	22860	в
4	50-176	13,0-17,8	558-823	25119-37042	г
5	176	17,8	823	37042	д
6	230	19,6	903	40653	е

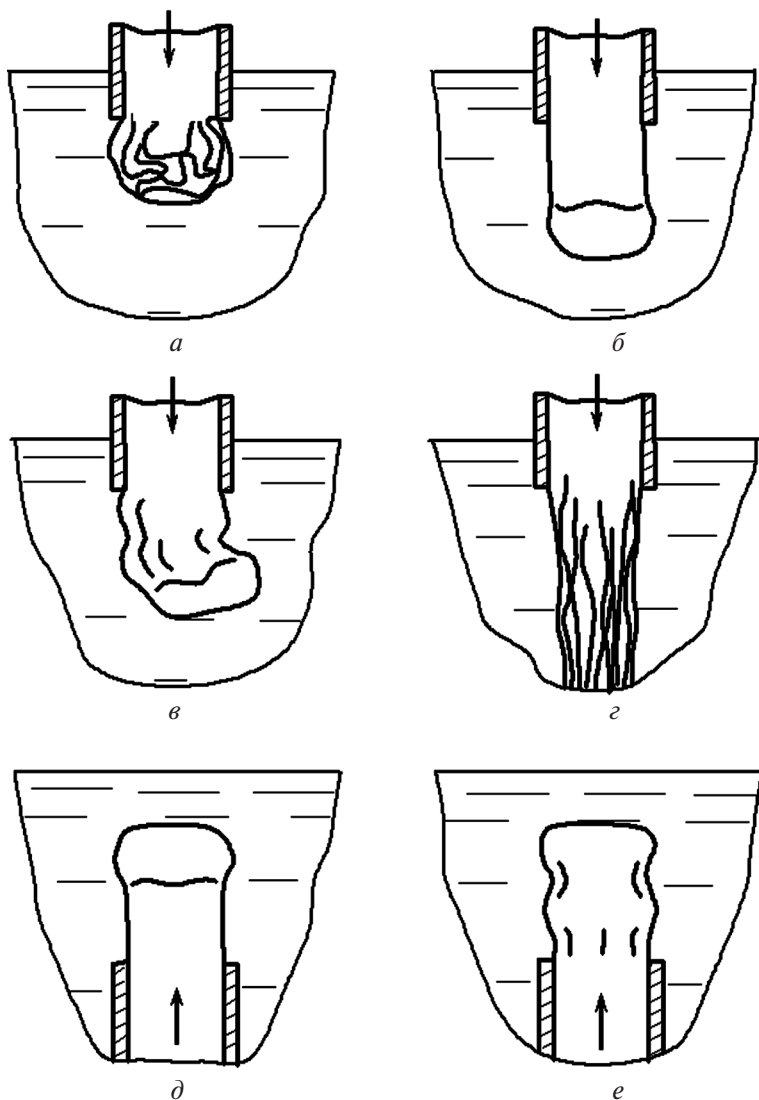


Рис. 2. Схематическое изображение начала истечения струй из сопла в жидкую среду при $K_p < 1$, $K_d < 1$ (позиции см. в таблице)

к ускоренному подъему лобовой части струи, ее округлению и утолщению, а также утончению следующей за ней цилиндрической части струи (таблица, опыт № 5; рис. 2, д). При дальнейшем увеличении скорости истечения струи парафина наблюдалось искривление поверхности струи. В этом случае скорость всплывания парафина оказывалась меньше скорости его подачи, что и вызывало деформацию поверхности струи (таблица, опыт № 6; рис. 2, е). При отклонении от вертикали оси впрыска парафиновой струи в воду силы плавучести искривляли струю в сторону свободной поверхности воды. Искривление усиливалось при повороте оси впрыска от вертикального к горизонтальному.

Применение глухих цилиндрических насадок затравок, закрывающих сопло в начальный момент литья и служащих опорой струе при вертикальном отводе ее от сопла, при разливке способствовало стабилизации процесса не только в начальный, но и в последующий периоды литья. При согласовании скорости вытекания струи со скоростью перемещения насадки были получены парафиновые стержни правильной формы в интервале $Re < 250$ (рис. 3, а). Отклонение от согласованности скоростей струи и насадки приводило либо к утолщению парафинового стержня, либо утоньшению и появлению на поверхности протяженных продольных каверн (рис. 3, б, в).

При моделировании процесса литья на зеркало охлаждающего расплава струя пара-

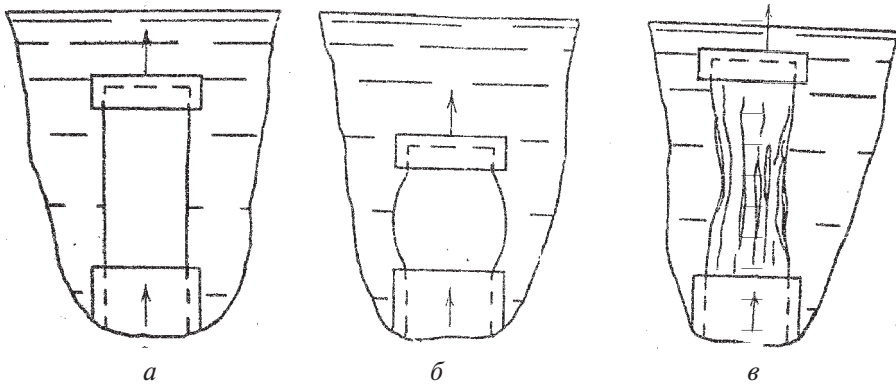


Рис. 3. Получение парафиновых слитков с помощью затравки: а - скорость вытекания струи согласована со скоростью перемещения затравки; б - скорость вытекания струи больше скорости перемещения затравки, в - скорость вытекания струи меньше скорости перемещения затравки

фина ($1,25 t_{пл}^c$) направлялась в лоток шириной 20 мм, который входил в воду ($0,29 t_{пл}^c$) под углами к горизонту $10-65^\circ$ между параллельными стенками емкости. Эти стенки располагались на расстоянии 23 мм друг от друга. Поток парафина стекал по лотку в воду и растекался по ее поверхности в направлении ввода. После затвердевания передней части струи парафин зажимался захватом и протягивался вдоль поверхности воды. Затем полоса вытягивалась из емкости через круглый борт, незначительно выступавший над поверхностью охлаждающей жидкости. Сплошные слитки постоянного сечения получены при $Re < 6$; $Fr < 0,02$; $We < 0,006$; $Nu = 4,2$; $\alpha = 1260 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $q = 56700 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Увеличение скорости разлики ($Re > 6$) резко усложняло согласование скоростей литья и вытяжки слитка, что приводило к его разрывам. При более высоких значениях α терялась пластичность отливаемой полосы и она деформировалась при выходе из емкости с водой. При более низких значениях α полоса часто разрывалась при ее удалении из емкости. Интенсивному растеканию парафина по воде способствовал его перегрев до $1,54-1,73 t_{пл}^c$ при температуре воды $0,12-0,38 t_{пл}^c$. Однако это приводило к высокой пористости в твердом парафине и неровностям на его поверхности. Подогрев воды до $0,48 t_{пл}^c$ и снижение температуры парафина до $1,35 t_{пл}^c$ уменьшили пористость слитка, сохранили хорошую растекаемость парафина и снизили разнотолщинность полосы ($Nu = 6,9$; $\alpha = 2100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $q = 138600 \text{ Вт}/\text{м}^2$).

Эти эксперименты также показали, что при реализации процессов с горизонтальным отводом заготовки необходимо обеспечивать ввод жидких объемов менее плотной фазы, поступающих в более плотную жидкую среду под углами $< 30^\circ$.

Изучение особенностей взаимодействия металлических струй с неподвижными металлическими расплавами в условиях варьирования соотношения их температур и плотностей при использовании металлических пар с областью несмешивания в жидком состоянии проводилось в два этапа. Вначале исследовалось взаимодействие свободно падающих металлических струй с поверхностью другого расплавленного металла. На втором этапе оценивалось влияние твердых стенок на процесс входа струи в объем металлического расплава. На первом этапе исследовались три варианта взаимодействия: струя металла входила в контакт с менее плотной металлической жидкостью (Pb или PbSb в Ga) $K_p = 1,75-1,79$; $K_\lambda = 0,54$; струя металла истекала на поверхность более плотного металлического расплава (Zn на Pb) $K_p = 0,65$; $K_\lambda = 3,04$; плотности металлов струи и расплава были равны (чугун в олово) - $K_p = 1,00$; $K_\lambda = 0,49$.

В результате экспериментов, в которых исследовался начальный период неизотермического взаимодействия струи металла с поверхностью менее плотного металлического расплава, установлены некоторые особенности таких контактных взаимодействий. Так, при вертикальном вводе струй PbSb ($1,04-1,11 t_{пл}^c$) сверху в жидкий Ga ($0,37-0,74 t_{пл}^c$) характер взаимодействия зависел не только от значений Re , Fr , We , Nu , α , q ,

но и от состояния межфазной поверхности. При скорости вертикальной струи сплава PbSb ($\rho = 10900 \text{ кг/м}^3$) до 0,1 м/с ($Re < 1111$, $Fr < 0,34$, $We < 7 \cdot 10^{-5}$) и ее контакте с поверхностью жидкого Ga ($\rho = 6090 \text{ кг/м}^3$) сплав не проникал через поверхность Ga в его объем, а растекался по ней, образуя грозди сферических и цилиндрических выступов на межфазной поверхности (рис. 4, а). Значение межфазного натяжения при этом оказывалось столь большим ($\sim 1,5 \text{ Н/м}$), что поверхностные силы совместно с силой Архимеда удерживали на поверхности жидкого Ga значительно больший по плотности металл. Прорыв Pb и PbSb в объем Ga происходил как при увеличении кинетической энергии струи ($v > 0,25 \text{ м/с}$, $Re > 2778$, $Fr > 2,13$), так и при подъеме температуры Ga до $0,93 t_{пл}$ и PbSb до $1,22 t_{пл}$. Но характер поверхности затвердевших струй в этих случаях был разным. При температурах Ga до $0,74 t_{пл}$ и скорости струи до 0,4 м/с ($q = 7,2 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$) струи Pb и PbSb затвердевали цилиндрическими с гладкой поверхностью на отдельных участках длины слитка. При этом его лобовая часть стремилась сфероидизироваться, а последующие объемы периодически истончались и искривлялись (рис. 4, б).

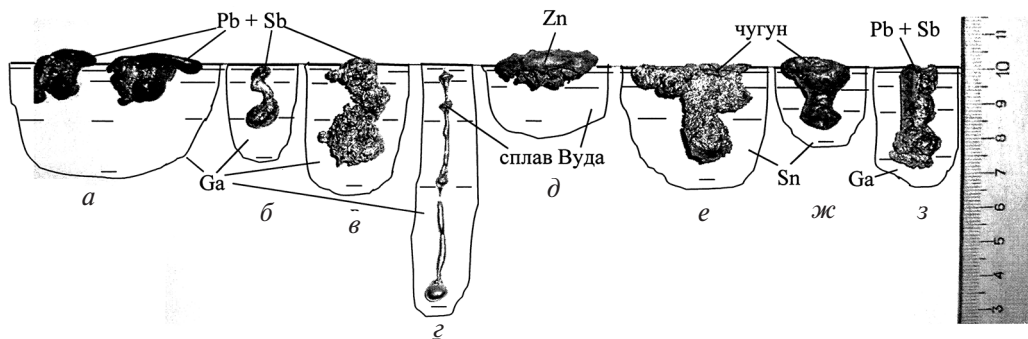


Рис. 4. Начальная фаза неизотермического взаимодействия металлических расплавов, отличающихся по плотности при вводе добавки на поверхность расплава: а- ж — взаимодействие свободно падающих струй жидкого металла с поверхностью другого расплавленного металла; з — влияние твердых стенок на процесс ввода жидкометаллической струи в объем металлического расплава

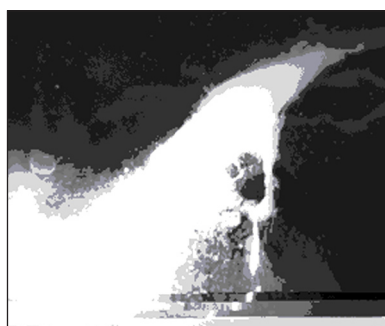
Подъем температуры жидкого Ga до $0,93 t_{пл}$, а температуры PbSb до $1,48 t_{пл}$ ($q = 8,3 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$) приводили к деформации всей поверхности затвердевшей струи с чередующимися выступами и впадинами (рис. 4, в). Вероятно, такой характер поверхности PbSb связан с появлением неустойчивости Марангони [21]. При указанных температурах происходило ускорение взаимной диффузии Ga и PbSb. Видимо, время контакта пограничного слоя перегретого Ga с не успевшим охладиться PbSb оказалось достаточным для инициирования диффузии, возникновения градиентов межфазного натяжения и появления ячеистой неустойчивости межфазной поверхности, которая была зафиксирована последующим быстрым затвердеванием струи. При увеличении скорости струи до 1,0 м/с и небольших температурах нагрева Pb ($1,01 t_{пл}$) и Ga ($0,1 t_{пл}$) ($q = 1,8 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$) взаимодействие струи происходило как и в случае втекания сплава Вуда в воду или Ga (рис. 3, з) с диспергированием свинца в объеме Ga с образованием множества пар — цилиндр с острыми концами и полусфера.

При вертикальном вводе струи металла на поверхность более плотной металлической жидкости установлено два режима взаимодействия. При подаче струи Zn ($1,15 t_{пл}$) со скоростью 0,2 м/с на жидкий ($0,24 t_{пл}$) сплав Вуда ($K_p = 0,69$; $K_x = 0,26$; $Re \approx 1034$; $Fr \approx 1,36$; $q = 7,41 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$) в зоне падения струи наблюдались затвердевшие струйки (рис. 4, д). Подъем температуры сплава Вуда до $0,48 t_{пл}$ при тех же значениях остальных параметров и $q = 5,46 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$ устранил образование утолщения в зоне внедрения струи Zn в сплав Вуда. Такой же результат был получен при снижении температуры струи Zn до $1,03 t_{пл}$ и использовании жидкого Pb с температурой $0,96 t_{пл}$ ($q = 734850 \text{ Вт/м}^2$), но в этом случае затвердевшая струя имела шероховатую поверхность. Ввод струи металла (чугун $1,13 t_{пл}$) в близкую по плотности металлическую среду (Sn, $0,22 t_{пл}$) со скоростью 0,25 м/с

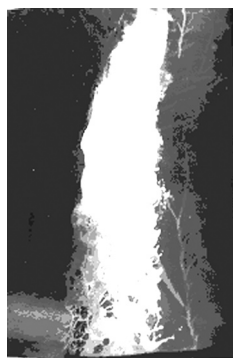
($Re \approx 609$; $Fr \approx 2,1$; $We \approx 2,6$; $\sigma_{12} \approx 0,5 \text{ Н/м}$; $q = 4,8 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$) привел к затвердеванию струи с неровной поверхностью и с формой, приближающейся к цилиндрической. Лобовая часть слитка имела округлую форму (рис. 4, *е*). Увеличение скорости струи до $0,5 \text{ м/с}$ ($Re \approx 1220$; $Fr \approx 8,5$; $We \approx 10,5$; $\sigma_{12} \approx 0,5 \text{ Н/м}$; $q = 5,1 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$), как и смена охлаждающей среды на PbSb, привели к вогнутости лобовой части струи, ее расширению и нарушению равномерности сечения последующих объемов струи (рис. 4, *ж*).

Использование короткой (10 мм) трубы ($d_c = 8 \text{ мм}$), погруженной в Ga ($0,15 t_{\text{пл}}$) при вводе через нее струи PbSb ($1,30-1,48 t_{\text{пл}}$), показало, что независимо от скорости подачи сплава в трубу в диапазоне $0,2-0,5 \text{ м/с}$ сплав в ней двигался с меньшей скоростью, чем струя, втекавшая в Ga. Применение более длинной (50 мм) трубки, заглубленной в Ga, приводило к истончению лобовой части потока сплава уже в трубе, а не только на выходе из сопла. Это характерно для начального периода ввода PbSb в Ga. Снижение скорости его подачи ($< 0,1 \text{ м/с}$) приводило к замораживанию струи в подающей трубке в зоне ее заглубления в Ga. При этом сплав “застревал” в трубке и процесс подачи прерывался. Перегрев Ga до $(0,74-0,92) t_{\text{пл}}$ равно как и увеличение скорости подачи сплава ($> 0,5 \text{ м/с}$) приводили к деформации формы струи, истекавшей из насадка в Ga, и увеличению площади межфазной поверхности металлов (рис. 4, *з*).

Оценка влияния твердой поверхности русла на форму истекающих в воздух металлических струй проведена также в натуральных условиях. Изучались потоки жидкой стали, истекающие по желобам в крупнотоннажные ковши. Наблюдения показали, что возмущения, возникающие на поверхности потоков стали, истекающих из печей, в значительной степени усиливаются на стадии свободного падения потоков (рис. 5). Наиболее разрушительные возмущения возникают в зоне отрыва потока стали от твердой поверхности русла. При этом от основного потока могут отделяться струйки нередко с существенным отклонением траектории от основного направления потока, а его поверхность сильно деформируется



а



б

Рис. 5. Форма струй стали, истекающих по желобу из плавильных агрегатов в крупнотоннажные ковши

(рис. 5, *а*). Причем в случае малой глубины потока на желобе ($\sim 0,5 \text{ м}$) и расширения русла в конце желоба струя стали при падении может фрагментарно терять сплошность (рис. 5, *б*). Причины такого явления связаны с интенсивным развитием коротковолновых возмущений и малой вязкостью расплава. Это нарушает компактность падающих металлических струй, повышает площадь их контакта с воздухом и снижает возможность глубинного проникновения струи в объем расплава в ковше.

В результате проведения исследований процессов взаимодействия металлов с охлаждающей жидкометаллической средой определили, что для технологических процессов, требующих диспергирования струи, уже в зоне контакта (суспензионное литье, получение гранул) выраженное стимулирование коротковолновых возмущений происходит при $K_p > 1$, $K_\lambda > 1$, температурах струи $t^c > 1,2 t_{\text{пл}}$ и среды $t^{cp} > 0,7 t_{\text{пл}}$, $Re > 2 \cdot 10^3$; $Fr > 8$; $We > 6$; $Nu \approx 10$, $q > 8 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$. При реализации метода смешения как при получении сплавов, так и легировании и раскислении металла для глубинного проникновения струй в расплав при их последующем диспергировании и перемешивании следует обеспечивать следующие условия для струй в газовой фазе перед внедрением в жидкую среду:

при $K_p > 1 - K_\lambda > 1$; $Re \ll 1000$; $Fr < 2$; $We \ll 1$, при $K_p < 1 - K_\lambda < 1$; $Re > 1000$; $< Fr > 5$; $We \ll 1$. Для литья шаров

предпочтительны следующие условия: $K_p = 1$, $K_\lambda > 1$, параметры струи в газовой среде перед внедрением в жидкость $Re < 30$; $We < 2$; $Fr < 2$; температура струи $> 1,1 t_{пл}^c$; число Nu при формировании шара в жидкости ~ 5 . Получение непрерывнолитых тел на зеркале охлаждающего расплава ($K_p > 1$) в случае равенства формы и размеров их сечения форме сопел, из которых истекают струи рационально при $K_\lambda > 1$; $Re < 1100$; $Fr \ll 1$; $We \ll 1$, температуры струй $\approx 1,1 t_{пл}^c$ и сред $\approx 0,4 t_{пл}^c$; $Nu > 4$. В случае несоответствия форм поперечного сечения сопла и слитка предпочтительно выполнение следующих условий: $K_\lambda \geq 1$; $Re < 10$; $Fr \ll 1$; $We \ll 1$; температуры струи $< 1,4 t_{пл}^c$ и среды $< 0,5 t_{пл}^c$; $Nu > 4$. Литье непрерывных тел под уровень охлаждающего расплава рационально проводить в условиях при $K_p > 1$; $K_\lambda > 1$; $Re \leq 20$; $We < 1$; $t^c < 1,3 t_{пл}^c$; $t^{cp} \approx 0,3 t_{пл}^c$; $Nu \approx 10$. Если разливаемый металл имеет меньшую плотность, чем среда ($K_p < 1$), то для струи необходимо использовать лобовой насадок-затравку и обеспечить значения $K_\lambda > 1$; $Re < 250$; $t^c < 1,2 t_{пл}^c$; $Nu \approx 10$.

Полученные результаты использованы, в частности, при разработке технологических процессов с применением электромагнитных воздействий на жидкометаллические среды для получения шарообразных и плоских тел [22], ковшового легирования стали жидкими ферросплавами [23] и обработки стали алюминием [24].



Список литературы

1. Волков Н. Г., Люберец И. И., Чумаков А. Н. и др. Производство ферросиликомарганециалюминия // *Металлург.* – 1987. – № 3. – С. 24 - 25.
2. Мельник С. Г., Поживанов М. А., Носоченко О. В. и др. Выплавка в дуговых электропечах лигатур и применение их для легирования и рафинирования конвертерной стали // *Международная конф. по электросталеплавному производству в Украине: состояние и перспективы развития внепечного рафинирования и модифицирования стали «Электросталь – 97».* – Днепропетровск: Гмет АУ, 1997. – С. 28.
3. Собкин Л. П., Климов П. И., Югов А. И. и др. Раскисление жидким алюминием в изложнице нестарейшей стали 08Ю // *Чер. металлургия. Бюл. ЦНИИТЭИ Чер. мет.* – 1979. – № 11. – С. 35- 36.
4. Мадянов А. М. Суспензионная разливка. – М.: Металлургия, 1969. – 184 с.
5. Крушенко Г. Г. Литье заэвтектических силуминов через жидкий азот // *Литейн. пр-во.* – 2002. – № 11. – С. 33.
6. Козенко А. В. Отливка шаров в жидких средах при наложении магнитных полей // *Прикладная магнитная гидродинамика.* – Киев: Госиздат. техн. лит. УССР, 1963. – С. 84-89.
7. Жевтунов П. П. Литейные сплавы. – М.: Машгиз, 1957. – 431 с.
8. Кулинский А. И., Агалаков В. В. Получение крупных сферических гранул магния методом диспергирования жидкого металла в солевом расплаве // *Цв. металлы.* – 1999. – № 5. – С. 76-77.
9. Дорошенко В. С. О возможности применения «мягких кристаллизаторов» для непрерывного литья // *Литейн. пр-во.* – 1994. – № 7. – С. 19-20.
10. Германн Э. Непрерывное литье: Пер. с нем. – М.: Металлургиздат, 1961. – 814 с.
11. Pat. 5392843 USA, МКИ6 В22В 17/1001. Continuous silber float casting of steel or plate // Dolan James J. – Publ. 28.02.95.
12. Вагафтик Н. Б. Теплофизические свойства веществ: Справочник. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 386 с.
13. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. Н. К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1005 с.
14. Гречко А. В., Нестеренко Р. Д., Кудинов Ю. А. Практика физического моделирования на металлургическом заводе. – М.: Металлургия, 1976. – 244 с.
15. Андронов В. П., Чекин Б. В., Нестеренко С. В. Жидкие металлы и и шлаки: Справочник. – М.: Металлургия, 1977. – 128 с.
16. Смитлз В. Дж. Металлы. – М.: Металлургия, 1980. – 446 с.
17. Исаченко В. Н., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

18. Петухов Б. С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. - М.: Энергия, 1967. - 412 с.
19. Меджибожский М. Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов. - Киев; Донецк: Вища школа, 1979. - 280 с.
20. Субботин В. И., Ушаков П. А., Габрианович Б. И. и др. Исследование теплоотдачи жидких металлов в стальных трубах // ИФЖ. - 1963. - № 4. - С.16-21.
21. Линде Х., Шварц П., Вильке Х. Диссипативные структуры и нелинейная кинетика неустойчивости Марангони // Гидродинамика межфазных поверхностей. - М.: Мир, 1984. - С. 79-116.
22. Dubodelov V. I., Seredenko V. A., Seredenko E. V. Casting formation by electro-magnetic controlling in the liquid metal coolant // Magnetohydrodynamics. - 2003. - V. 39, № 4. - P. 389-394.
23. Середенко В. А. Анализ легирования стали жидкими ферросплавами с использованием магнитодинамического агрегата при выпуске плавки в ковш // Процессы литья. - 2004. - № 1. - С. 10-21.
24. Середенко В. О. Бар'єрні ефекти при обробці рідкої сталі алюмінієм // Металознавство та обробка металів. - 2004. - № 1. - С. 35-39.

Поступила 11.02.20009

УДК 621.039.534.25:534.24

**В. П. Лихошва, В. Л. Найдек, Е. А. Рейнталь, А. П. Шатрава,
Л. А. Бондарь, С. С. Самотугин**

ТЕПЛОБМЕН В СИСТЕМЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУХФАЗНОГО ГАЗОЛАЗЕРНОГО ПОТОКА С МИШЕНЬЮ

Рассмотрен теплообмен в системе фурма (потокоформирующий агрегат) – мишень (модельная жидкость) в процессе нагрева дисперсных частиц в газолазерном потоке. Исследовано взаимодействие двухфазного потока с жидкостью.

Розглянуто теплообмін в системі фурма (агрегат, який формує потік) – мішень (модельна рідина) в процесі нагрівання дисперсних частинок в газолазерному потоці. Досліджено взаємодію двофазного потоку з рідиною.

Heat exchange in the tuyere (flow forming unit) and target (model liquid) system in the process of dispersed particles heating in gas-laser stream is considered. Interaction of two phase flow with liquid is researched.

Ключевые слова: теплообмен, дисперсные частицы, газолазерный поток.

При исследовании теплообмена в двухфазных потоках широко применяются методы математического моделирования. Тем не менее, использование чисто расчетных методов хотя и расширяет возможности понимания глубины какого-то отдельного явления, однако часто ограничено при исследованиях комплексных систем, охватывающих одновременно несколько параллельно протекающих процессов. В ряде случаев на этапах подготовки технологического процесса более эффективным оказывается использование методов моделирования и упрощенных расчетов на основе экспериментальных исследований, что позволяет оценить весь спектр сопутствующих явлений, взаимосвязей между ними, определить критические параметры процесса и выявить диапазоны эффективного технологического решения.

Известные исследования по нагреву частиц лазерным излучением [1-3] в большинстве случаев рассматривают процесс обособленно, только те аспекты, которые касаются состояния частиц, чаще всего это распределение поглощенной энергии и изменение температуры на поверхности и в объеме частицы. Однако для создания ряда технологических процессов (например, таких как формирование композиционных наплавочных